

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

GABRIELA DE OLIVEIRA ANDRADE

INFLUÊNCIA DO USO DE LODO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE
LAVANDERIA INDUSTRIAL COMO AGREGADO MIÚDO EM CONCRETO PARA
PAVIMENTO INTERTRAVADO

Joinville
2020

GABRIELA DE OLIVEIRA ANDRADE

INFLUÊNCIA DO USO DE LODO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE
LAVANDERIA INDUSTRIAL COMO AGREGADO MIÚDO EM CONCRETO PARA
PAVIMENTO INTERTRAVADO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil de Infraestrutura,
no curso Engenharia Civil de Infraestrutura da
Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Hastenpflug

Joinville
2020

RESUMO

As lavanderias industriais geram uma grande quantidade de efluentes que, após seu tratamento, geram lodo contendo metais pesados e rico em matéria orgânica. Com o intuito de criar uma alternativa para a destinação desse resíduo que não aterros industriais, este trabalho teve como objetivo determinar a influência do uso de lodo de ETE de uma lavanderia industrial em substituição da areia em concretos para produção de pavers. O resíduo foi substituído em teores de 5%, 7,5%, 15%, 22,5% e 30% para comparação com pavers com 0% de substituição. Os materiais empregados foram caracterizados quanto à granulometria e massa específica. Foram avaliadas as propriedades dos pavers quanto a resistência à compressão e absorção de água. Os resultados indicaram que a resistência à compressão dos pavers reduziu com a incorporação do lodo, enquanto a absorção de água diminuiu em traços com teores de substituição até 7,5%, e aumentando drasticamente a partir do teor de 15%. Dessa forma, sugeriu-se que o melhor traço para substituição por lodo foi o com teor de substituição de 7,5%, podendo ser utilizado em locais de leves solicitações como calçadas, ciclovias, condomínios residenciais e praças.

Palavras-chave: Lavanderia Industrial. Paver. Reciclagem. Lodo Têxtil.

ABSTRACT

Industrial laundries generate a large amount of effluents that, after their treatment, generate sludge containing heavy metals and rich in organic matter. In order to create an alternative for the destination of this waste other than industrial landfills, this study aimed to determine the influence of the use of textile effluent sludge to replace fine aggregate in concrete for the production of pavers. The residue was replaced in percentage of 5%, 7.5%, 15%, 22.5% and 30% for comparison with pavers with 0% replacement. The materials used were characterized in terms of particle size and specific gravity. Pavers properties were evaluated as for compressive strength and water absorption. The results indicated that the compressive strength of pavers reduced with the incorporation of sludge, while water absorption decreased in pavers with substitution percentages up to 7.5%, and increased drastically from the content of 15%. Thus, it was suggested that the best mix for sludge substitution was the one with 7.5% substitution content, which can be used in places as sidewalks, bike paths, residential condominiums and squares.

Keywords: Industrial Laundry. Paver. Recycling. Textile effluent sludge.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Claudia e Marco, e irmãos, Júnior e Ana Paula, que mesmo longe sempre me incentivaram na busca pelos meus sonhos.

Aos meus amigos, minha segunda família. Sem vocês essa trajetória não seria tão satisfatória.

Ao professor e orientador Daniel Hastenpflug, por toda a ajuda e orientação repassada em diversos momentos da graduação, especialmente durante esse trabalho.

À professora Viviane Lilian Soethe, pela ajuda e por fornecer o material que tornou esse estudo possível.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de uma ETE tipicamente empregada para tratamento de efluente têxtil.	13
Figura 2 – Estrutura típica de um pavimento intertravado.	17
Figura 3 – Espessura necessária de base.	18
Figura 4 – Influência da espessura da camada de areia no desempenho do pavimento.	19
Figura 5 – Modelos de pavers em diferentes formatos.	20
Figura 6 – Forças de deslocamento Horizontal.	21
Figura 7 – Forças de deslocamento Vertical.	21
Figura 8 – Peças de concreto para intertravamento vertical.	22
Figura 9 – Forças de deslocamento rotacional.	22
Figura 10 – Influência do lodo na microestrutura do concreto.	26
Figura 11 – Resultados de Análise Térmica de concretos com lodo.	27
Figura 12 – Resultados de Difração de Raio-X de concretos com lodo.	27
Figura 13 – ZTI formada em concreto com 15% de lodo.	28
Figura 14 – Metodologia da pesquisa experimental desse estudo.	29
Figura 15 – Lodo estudado no presente trabalho.	30
Figura 16 – Curva Granulométrica do Lodo Têxtil.	31
Figura 17 – Vibro-prensa utilizada para produção das placas de concreto.	37
Figura 18 – Molde para placa de concreto.	37
Figura 19 – Processo de corte das placas de concreto para produção de pavers.	38
Figura 20 – Paver após capeamento.	39
Figura 21 – Resultados de Resistências médias à compressão - 7 e 28 dias.	42
Figura 22 – Resultado do ensaio de absorção de água.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização típica dos despejos de lavanderias industriais. . . .	13
Tabela 2 – Resultados do ensaio de solubilização do lodo gerado em ETE de lavanderia industrial.	15
Tabela 3 – Influência do lodo na trabalhabilidade.	28
Tabela 4 – Resultado do ensaio de Fluorescência de Raio-x.	31
Tabela 5 – Especificações do Cimento CP II-F-40	32
Tabela 6 – Curva Granulométrica dos agregados miúdos.	33
Tabela 7 – Curva Granulométrica do Pedrisco.	34
Tabela 8 – Massas Específicas dos Materiais Ensaçados.	34
Tabela 9 – Dosagens para definição do traço piloto	35
Tabela 10 – Resultados de resistência à compressão para definição do traço piloto.	35
Tabela 11 – Dosagens para produção de pavers	36
Tabela 12 – Fator multiplicativo "p" em função da espessura da peça.	39
Tabela 13 – Resultados do ensaio de absorção de água	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo Geral	10
1.2	Objetivos Específicos	10
1.3	Limitações do Estudo	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Lavanderia Industrial e efluentes gerados	12
2.1.1	Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma Lavanderia Industrial	13
2.1.1.1	Tratamento Preliminar	14
2.1.1.2	Tratamento Primário	14
2.1.1.3	Tratamento Secundário	14
2.1.1.4	Tratamento Terciário ou Pós-tratamento	14
2.1.2	Classificação do Lodo de uma ETE de Lavanderia Industrial	14
2.2	Pavimento Intertravado	16
2.2.1	Estrutura do pavimento intertravado	16
2.2.1.1	Sub-leito	17
2.2.1.2	Sub-base	17
2.2.1.3	Base	18
2.2.1.4	Camada de Areia	18
2.2.1.5	Blocos de Concreto para pavimentos intertravados (Pavers)	19
2.2.2	Contenção lateral	20
2.2.3	Intertravamento	20
2.2.3.1	Intertravamento Horizontal	20
2.2.3.2	Intertravamento Vertical	21
2.2.3.3	Intertravamento Rotacional	22
2.2.4	Requisitos impostos pela Norma Brasileira	23
2.2.4.1	Exigências da norma brasileira ABNT NBR 15953:2011	23
2.2.4.2	Exigências da norma brasileira ABNT NBR 9781:2013	23
2.3	Reutilização de lodo têxtil na indústria da construção civil	24
2.3.1	Lodo para produção de blocos cerâmicos	25
2.3.2	Lodo para produção de concretos e pavers	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Caracterização dos Materiais	30
3.1.1	Lodo Têxtil	30
3.1.2	Processamento do Lodo Têxtil	31

3.1.3	Cimento	32
3.1.4	Agregados	32
3.1.4.1	Caracterização dos Agregados	33
3.1.4.2	Moldagem dos corpos de prova e escolha do traço piloto	34
3.2	Definição do Traço Piloto	35
3.3	Dosagem experimental dos corpos de prova	36
3.4	Produção dos Pavers	37
3.5	Ensaio Executados	38
3.5.1	Resistência à Compressão	38
3.5.2	Absorção de água	39
4	RESULTADOS E ANÁLISES	41
4.1	Resistência à compressão	41
4.2	Absorção de água	43
5	CONCLUSÕES	45
5.1	Sugestão de trabalhos futuros	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Lavanderias Industriais têm como produto final efluentes com grande quantidade de matéria orgânica e substâncias químicas utilizadas no serviço de lavagem. Por conta disso, após o tratamento desses efluentes em estações de tratamento, o resíduo final é um lodo que deve ser descartado em aterros industriais (BUSS et al., 2015). A destinação desse resíduo, assim como o seu transporte até o aterro industrial, tem significativo impacto financeiro para empresas de lavanderias. Pela questão de sustentabilidade, o descarte do resíduo em aterros industriais pode contribuir com maior poluição do ambiente.

A indústria da construção civil, por sua vez, causa grande impacto no meio ambiente em todas as suas atividades, principalmente durante a extração e processamento de matéria-prima. Recursos naturais são explorados de forma a afetar drasticamente a fauna, flora e o clima na região de beneficiamento, energia é consumida em quantidade elevada e resíduos são gerados de forma a poluir águas superficiais (BLUMENSCHNEIN, 2004). Por conseguinte, a reciclagem de resíduos incorporados em materiais da construção civil se tornou uma prática comum na indústria, uma vez que, além de reduzir o consumo de materiais, reduz os custos de produção.

Tanto o ramo de lavanderias industriais como o da construção civil vivenciaram os impactos consequentes do crescimento urbano atingindo seu ápice a partir da segunda metade do século XX, sendo necessário o desenvolvimento de tecnologias de produção que acompanhassem esse ritmo – com aumento da produtividade e, conseqüentemente, do descarte de resíduos. Diante deste cenário, iniciou-se uma reflexão acerca do futuro do planeta e sobre o papel do homem na preservação do mesmo (BARBOSA, 2008).

Perante a crescente necessidade de enquadrar-se às exigências do cenário mundial que, cada vez mais, pleiteiam a sustentabilidade do desenvolvimento, demanda-se a promoção de métodos inovadores e menos nocivos ao meio ambiente. Segundo Manzini e Vezzoli (2002), um produto está coerente com os conceitos de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável se: basear-se em recursos naturais (garantindo sua renovação); otimizar os recursos não renováveis e não acumular resíduos que o ecossistema não é capaz de neutralizar. Para Berlim (2012 apud MENEGUCCI et al., 2015, p. 3) “[...] o produto contemporâneo cada vez mais traz consigo aspectos que possam ser transformados e reutilizados para não agredir o meio ambiente, afim de se tornar um ciclo contínuo em que o descarte terá outro fim.”

No que concerne a indústria de lavanderias industriais, os efeitos nocivos da eliminação de resíduos, bem como seu custo de destinação geram apreensão e requerem soluções alternativas. Na construção civil, por sua vez, é um dos setores que provoca maior impacto ambiental devido ao elevado consumo de matéria prima e há, portanto, grande interesse na substituição de materiais, de modo a influenciar tanto na redução de impactos ambientais como no uso de recursos financeiros (FIORITI, 2007).

Isto posto, diversos autores como Velumani e Senthilkumar (2018), Sakthivel Sarathi (2019), Lekshmi e Sasidharan (2015), Sandesh, Varun e Prashanth (2014), Liu et al. (2020) e Wang et al. (2018) têm estudado a utilização de lodo de variadas composições e origens em associação com materiais cimentícios, obtendo materiais com custo reduzido e minimizando os problemas de descarte através de uma destinação alternativa para os mesmos. Esses autores conseguiram demonstrar que, apesar de o lodo exercer influência negativa em propriedades no concreto, como resistência à compressão, resistência a tração e trabalhabilidade, há potencial de uso para substituição de agregados finos na construção civil quando empregado em baixos teores. O presente estudo visa avaliar a substituição de agregado miúdo por lodo de lavanderia industrial na fabricação de blocos de concreto para pavimentação (pavers).

1.1 Objetivo Geral

Determinar a influência do uso de lodo em substituição da areia fina em concretos para produção de peças de pavimento intertravado.

1.2 Objetivos Específicos

- a. Caracterizar os materiais empregados;
- b. Desenvolvimento de concretos com lodo substituindo agregado miúdo (areia fina) em diferentes frações (0%; 5%; 7,5%; 15%, 22,5% e 30%);
- c. Analisar a influência de diferentes teores de resíduo nas propriedades do concreto endurecido – resistência à compressão e absorção;
- d. Avaliar o desempenho dos pavers desenvolvidos com as exigências da norma brasileira NBR 9781, quanto aos parâmetros de resistência à compressão e absorção de água.

1.3 Limitações do Estudo

Devido à pandemia que ocorreu no ano de realização desse trabalho, foi impossibilitada a realização de ensaios complementares que viabilizariam uma análise mais precisa do efeito do lodo no concreto. Sendo assim, o presente estudo se limitou a realizar os ensaios de resistência à compressão e absorção de água. As demais

propriedades dos pavers foram analisadas de acordo com os dados encontrados na literatura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Lavanderia Industrial e efluentes gerados

As lavanderias comerciais se tornam cada vez mais comuns no Brasil, sendo um setor em crescimento. Segundo Sindilav (2020), estima-se a existência de 8.000 lavanderias no Brasil, sendo 2.000 industriais. Juntas, essas lavanderias lavam 8.000 toneladas de roupas por dia, utilizando em torno de 190 toneladas/dia de produtos químicos.

Lavanderias industriais podem ser divididas entre lavanderias de roupas domésticas e industriais. No caso da lavagem industrial, o serviço pode ser aplicado a roupas novas ou usadas. Durante a lavagem de roupas novas, são realizadas operações de desengomagem, estonagem, destruição parcial e amaciamento dos tecidos (MENEZES, 2005). Já na lavagem de roupas usadas, normalmente, roupas profissionais e tecidos utilizados em hotéis e fábricas, os tecidos possuem maior quantidade de impureza sendo necessário produtos químicos que melhorem a ação de limpeza da água. Neste último caso, segundo Buss et al. (2015), o efluente proveniente das lavanderias industriais tem como características ser alcalino, altamente colorido, contendo grandes quantidades de sabões e detergentes sintéticos, óleos e graxas, sujidades e corantes, e apresentam demanda biológica de oxigênio (DBO) 2 a 5 vezes maior que a apresentada por esgotos domésticos. Todos esses fatores tornam o descarte do lodo sem tratamento um grande problema ambiental.

Segundo Menezes (2005), o sabão e outros detergentes utilizados na lavagem de roupas produzem uma suspensão contendo resíduos de sujeira e fibras de tecidos. Além dos detergentes, outros removedores de manchas, alvejantes, enzimas e amaciantes adicionam ao sistema um grande número de compostos químicos, aumentando a carga orgânica produzida. Assim, o efluente gerado na lavagem industrial contém sujeira das roupas juntamente com substâncias químicas utilizadas no processo de lavagem. Devido a presença de matéria orgânica, o efluente apresenta mau cheiro característico após certo tempo de estagnação.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de caracterização típicos de rejeitos de lavanderias industriais.

Tabela 1 – Caracterização típica dos despejos de lavanderias industriais.

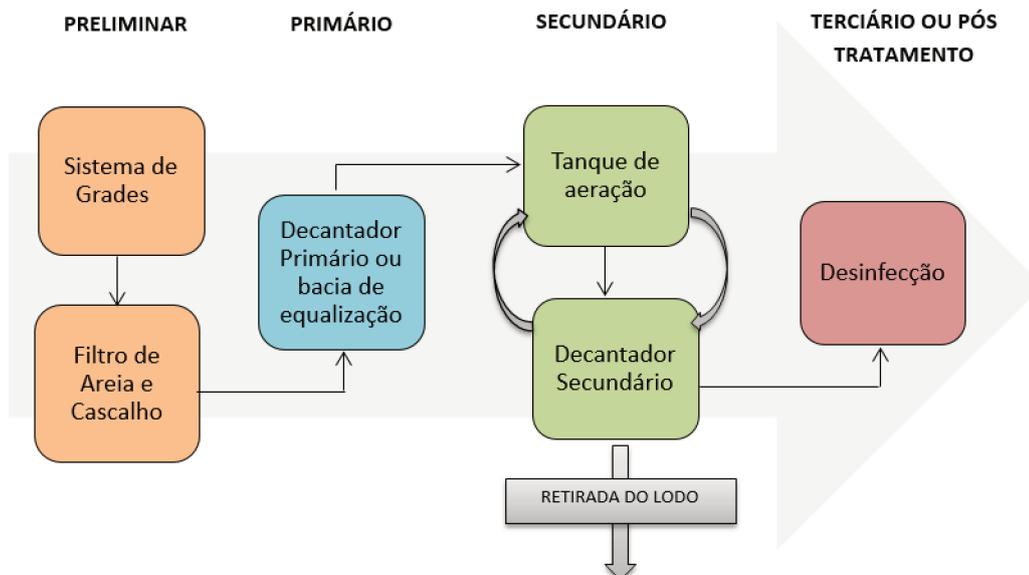
Parâmetro	Concentração
pH	8 a 11
Sólidos Totais	> 1000
Sólidos em suspensão	30 a 300 mgL ⁻¹
Alcalinidade Total	300 a 900 mgL ⁻¹
DBO	200 a 600 mgL ⁻¹
DQO	500 a 2000 mgL ⁻¹
Cromo total	Maior que 3,0 mgL ⁻¹ (nos efluentes de tingimento)
Vazão	120 a 380 m ³ por 1000m de tecido processado
Turbidez	Coloidal acinzentada
Cor aparente	Depende do corante usado com predominância

Fonte: (CATARINA, 1998 apud MENEZES, 2005, p. 6)

2.1.1 Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma Lavanderia Industrial

Uma estação de tratamento de efluentes de lavanderia industrial se assemelha à estação de tratamento de efluentes padrão, a qual possui as etapas descritas a seguir. A Figura 1 apresenta de forma esquemática uma ETE normalmente utilizada em tratamento de efluentes têxteis.

Figura 1 – Esquema de uma ETE tipicamente empregada para tratamento de efluente têxtil.



Fonte: Adaptado de (KUNZ et al., 2002)

2.1.1.1 Tratamento Preliminar

Consiste na remoção de sólidos grosseiros e flutuantes através de um processo de peneiramento e/ou sedimentação por gradeamento e peneiras. Geralmente, uma planta de estação de tratamento de lavanderias industriais iniciam o tratamento do seu efluente com o sistema de grades. Esse sistema tem como objetivo remover fibras de tecidos e resíduos mais grosseiros que se desprendem das roupas na lavagem (BUSS et al., 2015).

2.1.1.2 Tratamento Primário

Trata-se da remoção de sólidos sedimentáveis e parte dos sólidos suspensos através de sedimentação, flotação ou filtração, originando o lodo primário. Geralmente são aplicados físicos de filtração e sistemas físico-químicos de precipitação e coagulação primários (em decantadores), onde são removidos os resíduos grosseiros que passaram pelo sistema de gradeamento (KAMINATA, 2008).

2.1.1.3 Tratamento Secundário

Nessa etapa ocorre a estabilização da matéria orgânica através de sistemas de tratamento biológico. Os sistemas de lodos ativados são comumente aplicados nessa etapa. Esse sistema corresponde a uma agitação dos efluentes na presença de microorganismos e ar, durante um tempo necessário para metabolizar e flocular parte da matéria orgânica, produzindo grande volume de lodo (KUNZ et al., 2002)

Após o tempo necessário de agitação, o efluente é bombeado para os decantadores secundários, onde parte do lodo gerado é recirculado ao tratamento biológico e outra parte é levada para armazenamento e, posteriormente, encaminhada aos leitos de secagem. Repete-se a etapa de recirculação do lodo até que, enfim, o mesmo seja levado para armazenamento e em seguida para os leitos de secagem (KAMINATA, 2008).

2.1.1.4 Tratamento Terciário ou Pós-tratamento

Trata-se da etapa de desinfecção, onde remove-se microorganismos e nutrientes como nitrogênio orgânico, amônia e fósforo. O objetivo principal da desinfecção é destruir os microorganismos enteropatogênicos, que podem estar presentes no efluente tratado, para tornar segura a água receptora para uso posterior (LAPOLLI et al., 2005).

2.1.2 Classificação do Lodo de uma ETE de Lavanderia Industrial

Segundo a norma NBR 10004 ABNT (2004), a classificação dos resíduos sólidos se dá através da avaliação dos componentes do mesmo quanto ao perigo

envolvendo o material: Classe I – Perigoso e Classe II – Não perigosos. Na Classe I – Perigosos, esses podem ser classificados por diferentes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. A Classe II – Não Perigosos, por sua vez, é dividida entre materiais não inertes (A) e inertes (B).

O lodo proveniente da ETE de uma lavanderia industrial não apresenta características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, sendo classificado como Classe II – Não Perigoso. Com relação a solubilização, esse tipo de lodo geralmente apresenta certa quantidade de metais como alumínio, cobre, ferro, magnésio, cálcio, potássio e sódio. (Tabela 2), o que classifica o material como “Não Inerte”.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de solubilização do lodo gerado em ETE de lavanderia industrial.

Parâmetro	Resultado da Amostra	Limite Máximo (NBR 10.004)
Dureza (mgL ⁻¹)	826,02	500,00
Fenol (mgL ⁻¹)	ND	0,001
Mercúrio (mgL ⁻¹)	ND	0,001
Arsênio (mgL ⁻¹)	ND	0,05
Bário (mgL ⁻¹)	0,348	1,0
Cádmio (mgL ⁻¹)	0,008	0,005
Chumbo (mgL ⁻¹)	0,045	0,05
Cromo (mgL ⁻¹)	ND	0,05
Alumínio (mgL ⁻¹)	2,092	0,2
Ferro (mgL ⁻¹)	0,143	0,3
Manganês (mgL ⁻¹)	0,035	0,1
Sódio (mgL ⁻¹)	247,5	200,0
Zinco (mgL ⁻¹)	0,032	5,00
Cobre (mgL ⁻¹)	ND	1,0
Cianeto (mgL ⁻¹)	< 0,1	0,1
Fluoreto (mgL ⁻¹)	< 0,08	15,0
Nitrato (mgL ⁻¹)	2,37	10,0
Cloreto (mgL ⁻¹)	631,71	250,0
Sulfato (mgL ⁻¹)	165,66	400,0
Surfactantes (mgL ⁻¹)	ND	0,2

Fonte: Menezes (2005)

Sendo assim, o lodo proveniente da ETE de uma lavanderia industrial é classificado como resíduo de Classe IIA (Não Perigoso e Não Inerte), tornando possível o seu reaproveitamento, sendo frequentemente destinado a aterros industriais.

2.2 Pavimento Intertravado

Segundo (ABCP, 2010), os pavimentos intertravados foram inicialmente utilizados na Mesopotâmia, há aproximadamente 5.000 anos a.C., utilizando pedras como revestimento. Muitos anos depois, esse método evoluiu para o uso de pedras talhadas (como exemplo, o paralelepípedo), porém, devido à grande dificuldade de execução do método com esse material e à falta de conforto de rolamento gerada pelo mesmo, foram desenvolvidas peças de concreto pré-fabricadas (pavers) para sua substituição.

A norma brasileira NBR 9781 ABNT (2013) define pavimento intertravado como um pavimento flexível com estrutura formada por camadas de base e sub-base, seguidas de uma camada de revestimento construída com peças de concreto justapostas. Entre as peças é aplicado material de rejuntamento e o intertravamento é proporcionado por contenção.

O intertravamento consiste na capacidade dos blocos de resistir aos movimentos individuais, sendo esses os deslocamentos verticais, rotacionais e horizontais. Ao resistir à esses esforços, o pavimento obtém desempenho e durabilidade adequados. Essa capacidade é possível através do confinamento lateral – que impede o movimento lateral das peças, e da utilização da área de selagem, que distribui os esforços solicitantes entre os blocos do pavimento (ABCP, 2010).

Segundo CARVALHO (1998), o pavimento intertravado tem como vantagens:

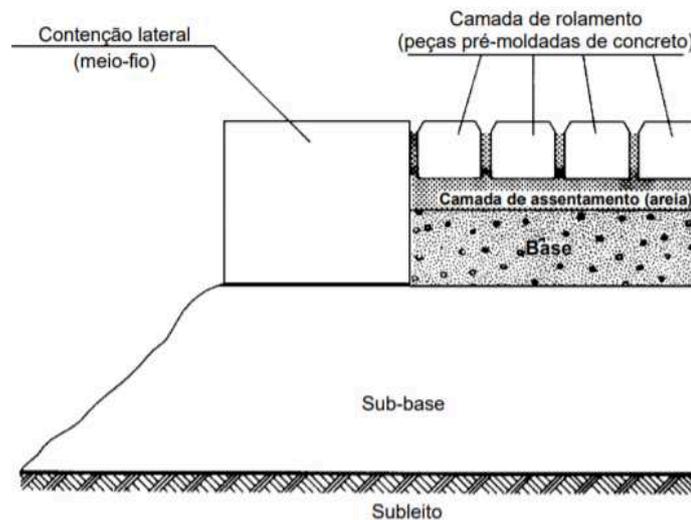
- Baixo custo de manutenção, devido à necessidade de retirar apenas a área a sofrer manutenção;
- Possibilidade de ser posto em serviço imediatamente após a execução;
- Boa superfície de rolamento para velocidade de até 80 Km/h;
- Baixo custo;
- Qualidade controlada;

O método de dimensionamento de pavimentos intertravados oficial utilizado no Brasil é o ABCP ET-27 de CARVALHO (1998). Segundo CRUZ (2003), o pavimento intertravado apresenta comportamento estrutural quase semelhante ao de pavimentos flexíveis, condição registrada pela maioria dos métodos de dimensionamento deste tipo de pavimento.

2.2.1 Estrutura do pavimento intertravado

A estrutura típica de um pavimento intertravado está esquematizada na Figura 2, sendo composta por subleito, sub-base, base, camada de assentamento e camada de rolamento.

Figura 2 – Estrutura típica de um pavimento intertravado.



Fonte: CARVALHO (1998)

2.2.1.1 Sub-leito

A camada de sub-leito consiste na camada compactada e regularizada formada pelo solo natural ou solo proveniente de empréstimo. CARVALHO (1998) usa como parâmetro de projeto para a camada de sub-leito o valor de CBR do material, recomendando reforço de camada de 30cm de espessura ou substituição do material para quando o mesmo apresentar CBR inferior a 2%.

2.2.1.2 Sub-base

Como citado anteriormente, o pavimento intertravado apresenta comportamento quase semelhante ao de pavimentos flexíveis (CRUZ, 2003). Logo, as camadas estruturais apresentam a mesma função. A camada de sub-base corresponde à uma camada que complementa a base, quando por circunstâncias técnico-econômicas não for aconselhável construir a base diretamente sobre o sub-leito (DNIT, 2006).

CARVALHO (1998) recomenda o dimensionamento de sub-base em pavimentos intertravados dependendo do tráfego local (Número de solicitações do eixo padrão "N") e de propriedades do sub-leito, que definem valores mínimos de CBR para o material adotado e a espessura a ser aplicada:

- Quando $N \geq 0,5 \cdot 10^6$, o material de sub-base deve apresentar um CBR mínimo de 30%.
- Quando $N < 0,5 \cdot 10^6$, o material de sub-base deve apresentar um CBR mínimo de 20%.
- Quando $N < 0,5 \cdot 10^6$ e o sub-leito apresentar CBR superior a 20%, não é

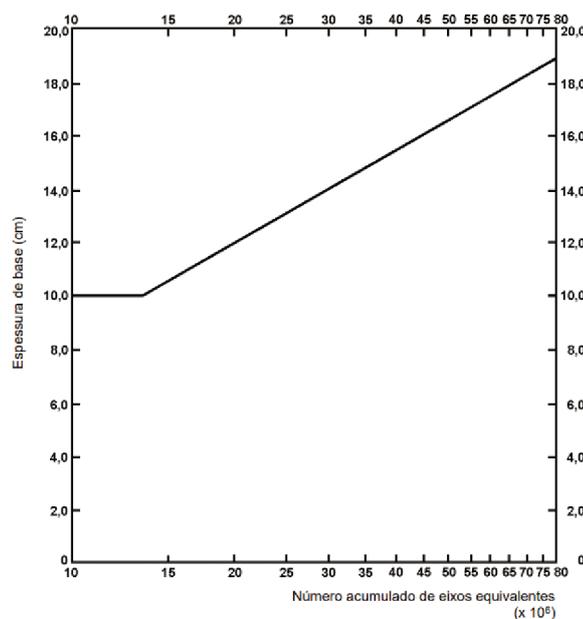
necessária a camada de sub-base.

- Quando $N \geq 0,5 \cdot 10^6$ e o sub-leito apresentar CBR superior a 30%, não é necessária a camada de sub-base.

2.2.1.3 Base

A camada de base é aquela destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego (DNIT, 2006). CARVALHO (1998) recomenda o uso de materiais que proporcionam a formação de uma camada impermeável e de considerável resistência mecânica, pois em estudos teóricos e práticos, estes mostraram ser os melhores materiais para aplicação de base. O dimensionamento da camada depende diretamente do tráfego local (Número "N"), como observado na Figura 3. Entretanto, é importante citar que quando $N < 0,5 \cdot 10^6$, a camada de base não será necessária.

Figura 3 – Espessura necessária de base.



Fonte: CARVALHO (1998)

2.2.1.4 Camada de Areia

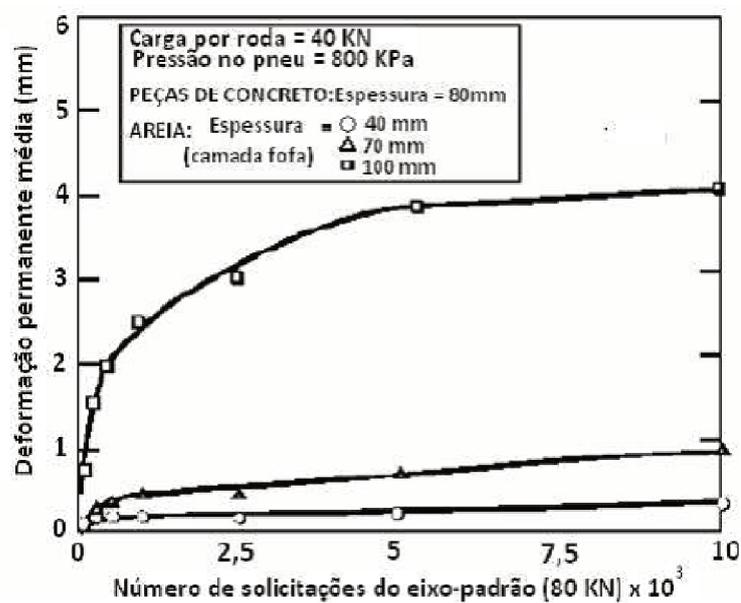
Segundo Beaty (1996 apud CRUZ, 2003, p. 20), a camada de areia é a camada responsável por garantir a regularidade do pavimento, compensando qualquer irregularidade de espessura dos pavers e irregularidades da base. Deverá ser composta de areia, com tolerâncias de no máximo 5% de silte e argila e de 10% de material retido na peneira de 4,8 mm (CARVALHO, 1998).

Segundo (ABCP, 2010), a camada de areia é composta por uma areia média, limpa e seca, com espessura uniforme e constante. Essa camada tem como funções:

- Proporcionar a transferência de esforços entre os blocos de concreto, permitindo que eles suportem juntos as cargas solicitantes.
- Acomodar as peças de concreto, proporcionando correto nivelamento do pavimento e permitindo variações na espessura das peças de concreto.
- Preencher as juntas entre os blocos, iniciando o processo de intertravamento.

Segundo Shackel (1991), a espessura da camada de areia influencia no desempenho do pavimento. Na Figura 4 pode-se observar a relação entre a espessura da camada de areia com a deformação permanente do pavimento intertravado.

Figura 4 – Influência da espessura da camada de areia no desempenho do pavimento.

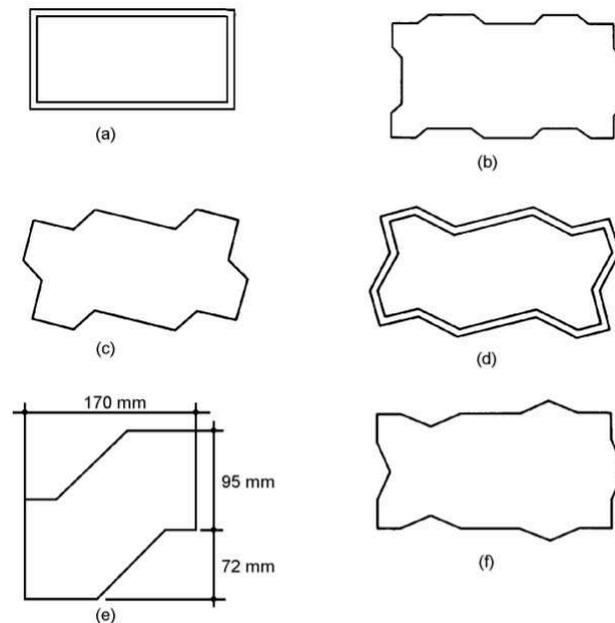


Fonte: Shackel (1991)

2.2.1.5 Blocos de Concreto para pavimentos intertravados (Pavers)

Segundo CRUZ (2003), os primeiros pavimentos de concreto foram produzidos no final do século XIX, porém ocorreram grandes avanços na utilização de pavers após a Segunda Guerra Mundial, durante a reconstrução de países como Alemanha e Holanda. Na década de 70 as fábricas de pavers se popularizaram pelo mundo, produzindo blocos com grande variedade de formas e tamanhos. Os pavers têm como vantagens a diversidade de cores, tamanhos e formas (Figura 5); a elevada resistência, garantindo grande durabilidade; além da possibilidade de transformá-lo em um produto ecológico e sustentável: são produtos à base de cimento que – em sua composição – permitem o uso de materiais reciclados e reutilizados (ABCP, 2010).

Figura 5 – Modelos de pavers em diferentes formatos.



Fonte: CARVALHO (1998)

2.2.2 Contenção lateral

Todo pavimento intertravado deverá ter, obrigatoriamente, contenção lateral. Essa tem como função principal o confinamento dos blocos de concreto, impedindo o deslocamento lateral da camada de rolamento (ABCP, 2010). Ainda segundo ABCP (2010), existem dois tipos de confinamento: o externo, que envolve todo o perímetro do pavimento (geralmente sarjetas e meio-fios); e o interno, que envolve as estruturas que se encontram dentro do pavimento (bocas de lobo, canaletas, jardins, etc). A contenção lateral deve ser executada antes colocação da areia de assentamento e dos blocos de concreto.

2.2.3 Intertravamento

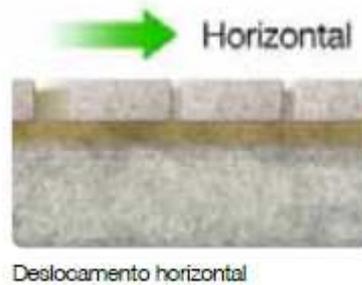
O intertravamento é a capacidade dos pavers resistir aos movimentos horizontais, verticais e rotacionais, sendo divididos nos três tipos detalhados a seguir.

2.2.3.1 Intertravamento Horizontal

O intertravamento horizontal é a incapacidade de cada peça de se deslocar horizontalmente em relação às peças vizinhas, como esquematizado na Figura 6 (KNAPTON, 1996). Para CRUZ (2003), esse tipo de intertravamento é diretamente relacionado com o formato e arranjo de assentamento das peças de concreto, que alteram a distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal causados pelo tráfego,

principalmente durante a aceleração e frenagem. As juntas entre as peças, quando devidamente executadas, são as responsáveis por esse tipo de intertravamento.

Figura 6 – Forças de deslocamento Horizontal.



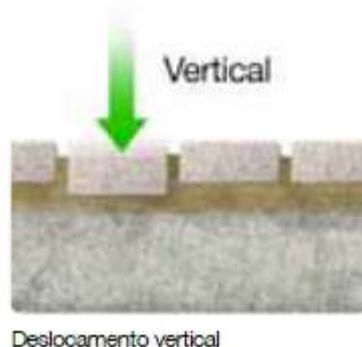
Fonte: ABCP (2010)

2.2.3.2 Intertravamento Vertical

Segundo Knapton (1996), o intertravamento vertical é a incapacidade de cada peça de se deslocar verticalmente em relação às peças vizinhas (Figura 7). Tal incapacidade pode ser conseguida através da absorção dos esforços de cisalhamento realizados pelas juntas de areia e pela capacidade de suporte estrutural das camadas inferiores do pavimento.

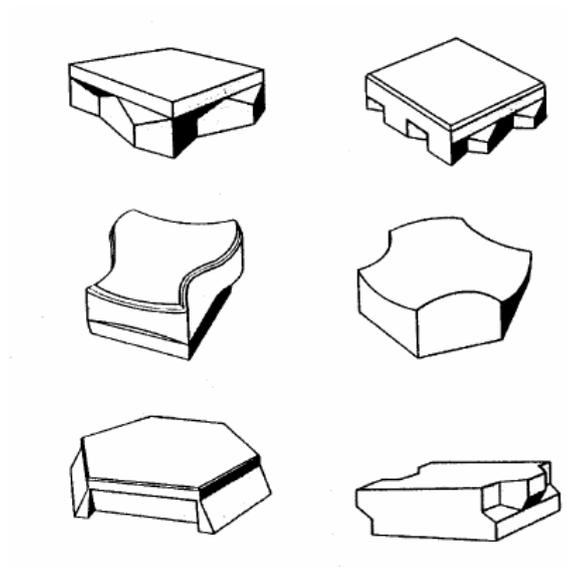
O intertravamento vertical pode ser obtido, também, utilizando peças de formatos e encaixes reentrantes um a um. Com isso, ao ser aplicada a carga, o encaixe do tipo macho-fêmea distribui os esforços para as peças vizinhas (CRUZ, 2003). A Figura 8 apresenta diferentes peças que proporcionam esse tipo de intertravamento.

Figura 7 – Forças de deslocamento Vertical.



Fonte: ABCP (2010)

Figura 8 – Peças de concreto para intertravamento vertical.



Fonte: CRUZ (2003)

2.2.3.3 *Intertravamento Rotacional*

O intertravamento rotacional é a incapacidade de cada peça de rotacionar em relação ao próprio eixo em qualquer direção. Tal incapacidade pode ser conseguida através do confinamento gerado pelas peças vizinhas nas juntas de areia (KNAPTON, 1996). Para CRUZ (2003), o fenômeno de rotação da peça é causado pelo tráfego em áreas de frenagem, aceleração e giro. Também pode ser encontrado em áreas com confinamento lateral falho.

Figura 9 – Forças de deslocamento rotacional.



Fonte: ABCP (2010)

2.2.4 Requisitos impostos pela Norma Brasileira

No Brasil temos duas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) referentes à pavimentos intertravados. São elas: ABNT NBR 9781(2013) Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio; e ABNT NBR 15953 (2011) Pavimento intertravado com peças de concreto — Execução.

O detalhamento das exigências das normas citadas estão descritas nos próximos tópicos.

2.2.4.1 Exigências da norma brasileira ABNT NBR 15953:2011

A NBR 15953 ABNT (2011) estabelece os requisitos para a execução do pavimento intertravado com peças de concreto sujeito ao tráfego de pedestres, de veículos e áreas de armazenamento de produtos. Ela determina os parâmetros de execução e fiscalização da obra, bem como premissas referentes às diferentes camadas do pavimento intertravado.

Para a execução da camada de revestimento, deve ser realizado reconhecimento do local, definição da área a ser pavimentada, das bordas e limites do pavimento, assim como dos acessos e locais para estocagem de materiais e equipamentos. A preparação da área a ser pavimentada deve atender requisitos estabelecidos para recebimento do sub-leito e da base (ou sub-base e base).

O sub-leito pode ser construído de solo natural do local ou proveniente de empréstimo, devendo apresentar índice de suporte califórnia (CBR) maior que 2% e expansão volumétrica menor ou igual a 2%. Toda a camada deve estar limpa, sem a presença de matéria orgânica de qualquer tipo, e deve estar bem drenada, respeitando rebaixamento mínimo de 1,5 metros do lençol freático em relação a cota final da superfície do pavimento. Por fim, a camada final do subleito deve apresentar a cota definida no projeto e ter os mesmos caimentos da camada de revestimento do pavimento pronto, sendo recomendado o caimento mínimo de 2%. A camada de sub-base ou base pode ser constituída de materiais pétreos, como agregados industriais, agregados reciclados e cascalho ou misturas estabilizadas com cimento.

A área a ser pavimentada deve ser limpa, com retirada de materiais inadequados, e o isolamento e sinalização da área devem ser realizados. Deve ser verificada a disponibilidade e condições de uso dos equipamentos necessários. As peças de concreto a ser utilizadas devem cumprir as especificações exigidas pela NBR 9781 ABNT (2013).

2.2.4.2 Exigências da norma brasileira ABNT NBR 9781:2013

A NBR 9781:2013 ABNT (2013) estabelece requisitos e determina métodos de ensaio necessários para que peças de concreto para pavimentação sujeitas à tráfego

de pedestres, de veículos e áreas de armazenamento de produtos sejam considerados aceitáveis.

As dimensões e tolerâncias das peças de concreto devem apresentar medida nominal do comprimento de no máximo 250 mm; medida real da largura de no mínimo 97 mm na área da peça destinada à aplicação de carga do ensaio de resistência à compressão; medida nominal da espessura de no mínimo 60 mm, especificada em múltiplos de 20 mm; tolerâncias dimensionais em 3 mm para mais ou menos em comprimento, largura e espessura; e índice de forma (IF) menor ou igual a 4 para peças de concreto utilizadas em vias com tráfego de veículos ou áreas de armazenamento.

A resistência característica à compressão (f_{pk}) aos 28 dias para tráfego de pedestres e veículos leves deve ser maior ou igual 35 MPa, enquanto para veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados deve ser maior ou igual a 50 MPa. As peças de concreto com idade inferior a 28 dias devem apresentar no mínimo 80% do f_{pk} previamente especificado.

A absorção de água deve apresentar valor médio menor ou igual a 6%. Porém, conforme a norma, admite-se valores individuais inferiores a 7%.

A determinação de resistência à abrasão da amostra não é obrigatória, mas, quando especificada, deve atender valores de cavidade máxima menores ou iguais a 23 mm para tráfego de pedestres e veículos leves e menores ou iguais a 20 mm para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.

Deve ser realizada inspeção visual das peças de concreto amostradas de modo a identificar defeitos que possam vir a prejudicar o assentamento, desempenho estrutural ou estética do pavimento. São admitidas pequenas variações de coloração nas peças, mas elas devem apresentar aspecto homogêneo, arestas regulares, ângulos retos e devem ser livres de rebarbas, defeitos, delaminação e descamação.

2.3 Reutilização de lodo têxtil na indústria da construção civil

Segundo Ângulo, Zordan e John (2001), a reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil se tornou uma importante prática para a sustentabilidade, diminuindo o impacto ambiental gerado pela indústria e reduzindo custos. A atividade de reciclagem pode gerar diversos benefícios, dentre eles a redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, de áreas necessárias para aterro, e por fim, da poluição.

O lodo têxtil vem sendo estudado como resíduo de substituição e incorporação em diferentes materiais da construção civil, como argamassas, concretos e blocos cerâmicos, de modo a viabilizar sua aplicação para garantir os benefícios da reciclagem citados anteriormente.

2.3.1 Lodo para produção de blocos cerâmicos

Herek (2009), ao realizar um estudo de incorporação do lodo têxtil em blocos cerâmicos, comprovou que a resistência à compressão destes blocos é inversamente proporcional ao teor de lodo incorporado, enquanto a absorção de água é diretamente proporcional. Ainda segundo Herek (2009), foi observado através de ensaio de Microscopia eletrônica de Varredura (MEV) que o tamanho dos poros é aumentado com a incorporação do lodo, o que explica os resultados citados anteriormente.

Por outro lado, Kaminata (2008) realizou o estudo de substituição de argila por lodo têxtil e constatou que uma substituição de 15% obteve um produto com maior garantia de qualidade técnica, com resistência à compressão acima do valor mínimo exigido pela norma e ganhando resistência de aderência de argamassa.

2.3.2 Lodo para produção de concretos e pavers

Diversos autores, citados a seguir, vêm estudando a incorporação de lodo de diferentes origens e seus efeitos na microestrutura e propriedades mecânicas do concreto. Em relação às propriedades mecânicas, os estudos relacionados vêm sendo feitos utilizando o lodo como substituição do cimento e de agregado fino.

Velumani e Senthilkumar (2018) substituiu cimento por lodo têxtil em pavers, com porcentagens variando de 10% a 35%. Ele constatou ganho de resistência à compressão no teor de 10% e, demonstrou que acima dessa porcentagem, a resistência foi inversamente proporcional ao teor de lodo substituído. A absorção de água, por sua vez, foi diretamente proporcional ao teor de lodo incorporado.

Sakthivel Sarathi (2019) substituiu lodo por agregado miúdo e verificou que as resistências à tração e compressão diminuem proporcionalmente conforme o aumento do teor de lodo têxtil substituído. Sendo assim, o autor recomenda o teor máximo de substituição de 30% de lodo têxtil.

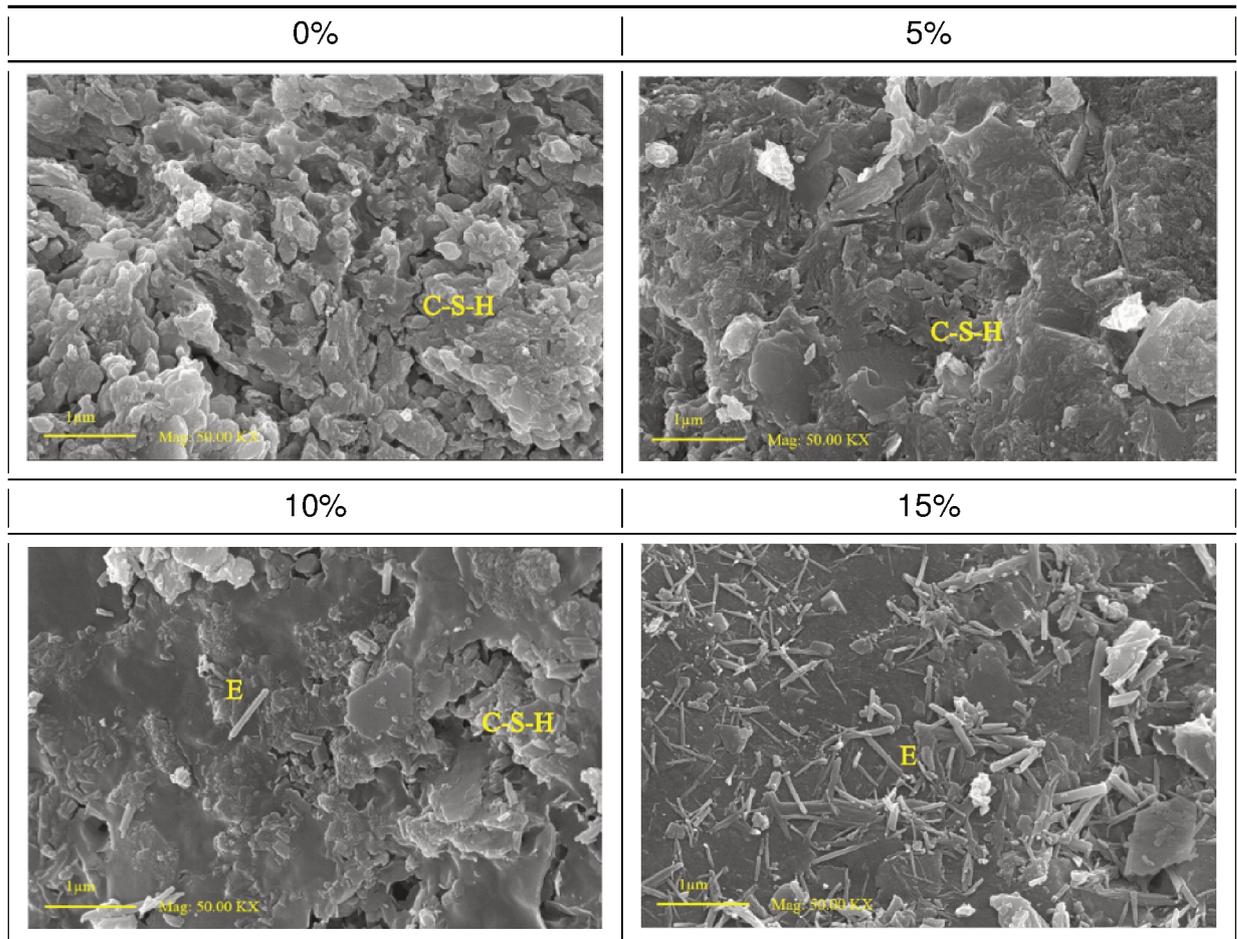
Lekshmi e Sasidharan (2015) investigou concreto com utilização de lodo têxtil em diferentes proporções para duas variedades de consumo de cimento. Ele concluiu que com o aumento da proporção de lodo há diminuição na resistência do concreto. Até 10% de lodo pode ser adicionado ao concreto para substituição do cimento.

Sandesh, Varun e Prashanth (2014) estudou a substituição de lodo têxtil por cimento em proporções até 9% e mostrou que o abatimento do concreto reduziu de 35 mm no concreto controle para 8 mm no concreto com teor de substituição de 9%. Também foi constatada a diminuição nas resistências à compressão, tração e flexão nos concretos com lodo incorporado.

Liu et al. (2020) utilizou lodo de estação de tratamento de água na substituição de agregado miúdo em seu estudo. Em relação à microestrutura do concreto, ele concluiu que, a partir de 10% de substituição, conforme o aumento do teor de lodo

houve uma restrição proporcional na formação de C-S-H e foi observada maior formação de Etringita, como observado nas imagens de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostradas na Figura 10. Para Wang et al. (2018), isso pode ter sido causado pela presença de matéria orgânica presente no lodo, que impediu a formação de portlandita e C-S-H, causando redução na resistência à compressão. Outro fator que pode ter influenciado na resistência pode ser atribuído à perda de coesão entre lodo e matriz da pasta de cimento.

Figura 10 – Influência do lodo na microestrutura do concreto.

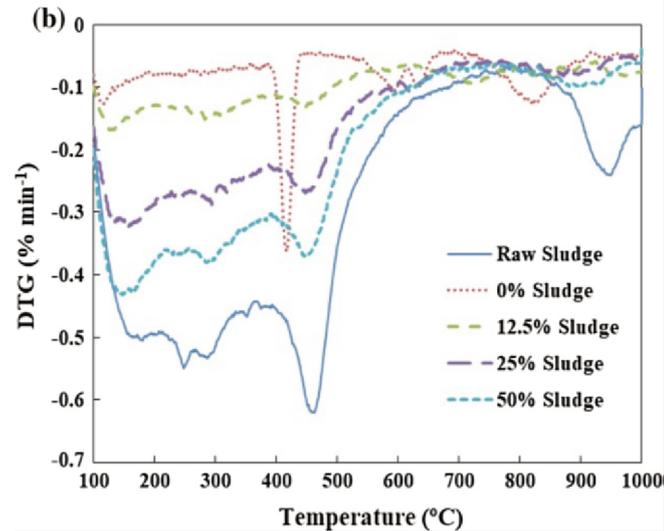


Fonte: Liu et al. (2020)

Wang et al. (2018) estudou a influência do lodo em concretos a partir de análise térmica e difração de raio-X. Na análise térmica, Figura 11, a amostra de controle apresentou um pico a 410° C correspondente à decomposição de Portlandita. Já nos traços com lodo, ocorreu o quase desaparecimento desse pico mesmo no menor teor analisado, de 12,5%. Isso mostra que a matéria orgânica do lodo interferiu na formação de CH e prejudicou a hidratação do cimento. Já na análise de Difração de Raio-X (Figura 12) foi demonstrado que o pico de Portlandita praticamente desapareceu nas amostras de concreto com lodo. Esse ensaio mostrou, também, que a queda no conteúdo de Portlandita foi de 6,7% no concreto piloto para 1,1% no teor de 12,5% de lodo. Existe também um pico suave de C_3S (alita) e de C_2S (belita) não reagidos nas

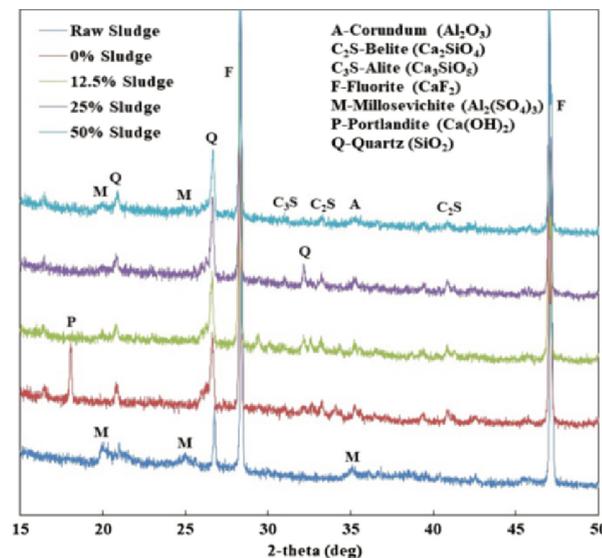
amostras com lodo incorporado, que causa a baixa resistência mecânica. Wang et al. (2018) relacionou esse efeito à matéria orgânica presente no lodo.

Figura 11 – Resultados de Análise Térmica de concretos com lodo.



Fonte: Wang et al. (2018)

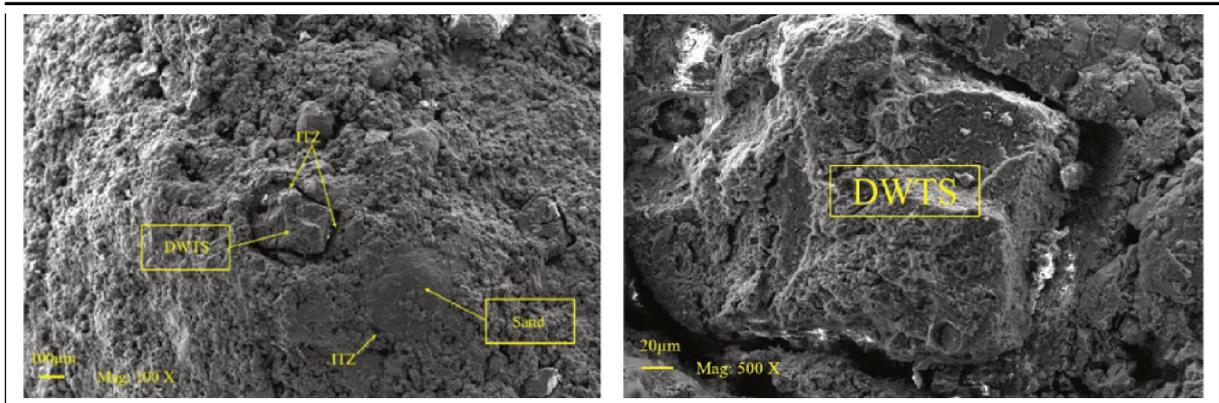
Figura 12 – Resultados de Difração de Raio-X de concretos com lodo.



Fonte: Wang et al. (2018)

Além disso, Liu et al. (2020) comparou a zona de transição (ZTI) observada no concreto controle com aquela em concretos com lodo. No concreto com lodo, a espessura da ZTI variou entre 30 e 40 μm apresentando uma fase mais ampla e porosa, enquanto a ZTI do concreto controle apresentou espessura máxima de 15 μm e relativamente mais densa (Figura 13). A causa desse fenômeno pode ser explicada pela alta capacidade de absorção de água do lodo seco, que impede a correta hidratação do cimento.

Figura 13 – ZTI formada em concreto com 15% de lodo.



Fonte: Liu et al. (2020)

Liu et al. (2020) também evidenciou que os paviers com incorporação de lodo em altas porcentagens apresentaram estrutura mais densa e, conseqüentemente, maior absorção de água. O traço com 5% de incorporação, por outro lado, apresentou estrutura mais densa e menor absorção de água que o traço piloto.

Mathye, Ikotun e Fanourakis (2020) observou que em pequenos teores de lodo, abaixo de 3%, melhoraram a trabalhabilidade do concreto. A partir dessa porcentagem a trabalhabilidade começa a ser prejudicada pela presença do lodo, conseqüência da alta absorção de água pelo lodo devido à grande área superficial das partículas. Sendo assim, constatou-se que esse efeito pode ser prejudicial para a resistência à compressão, devido aos altos teores de lodo atrelados ao baixo índice de água/cimento. A tabela 3 quantifica o efeito do lodo na trabalhabilidade encontrado por Mathye, Ikotun e Fanourakis (2020).

Tabela 3 – Influência do lodo na trabalhabilidade.

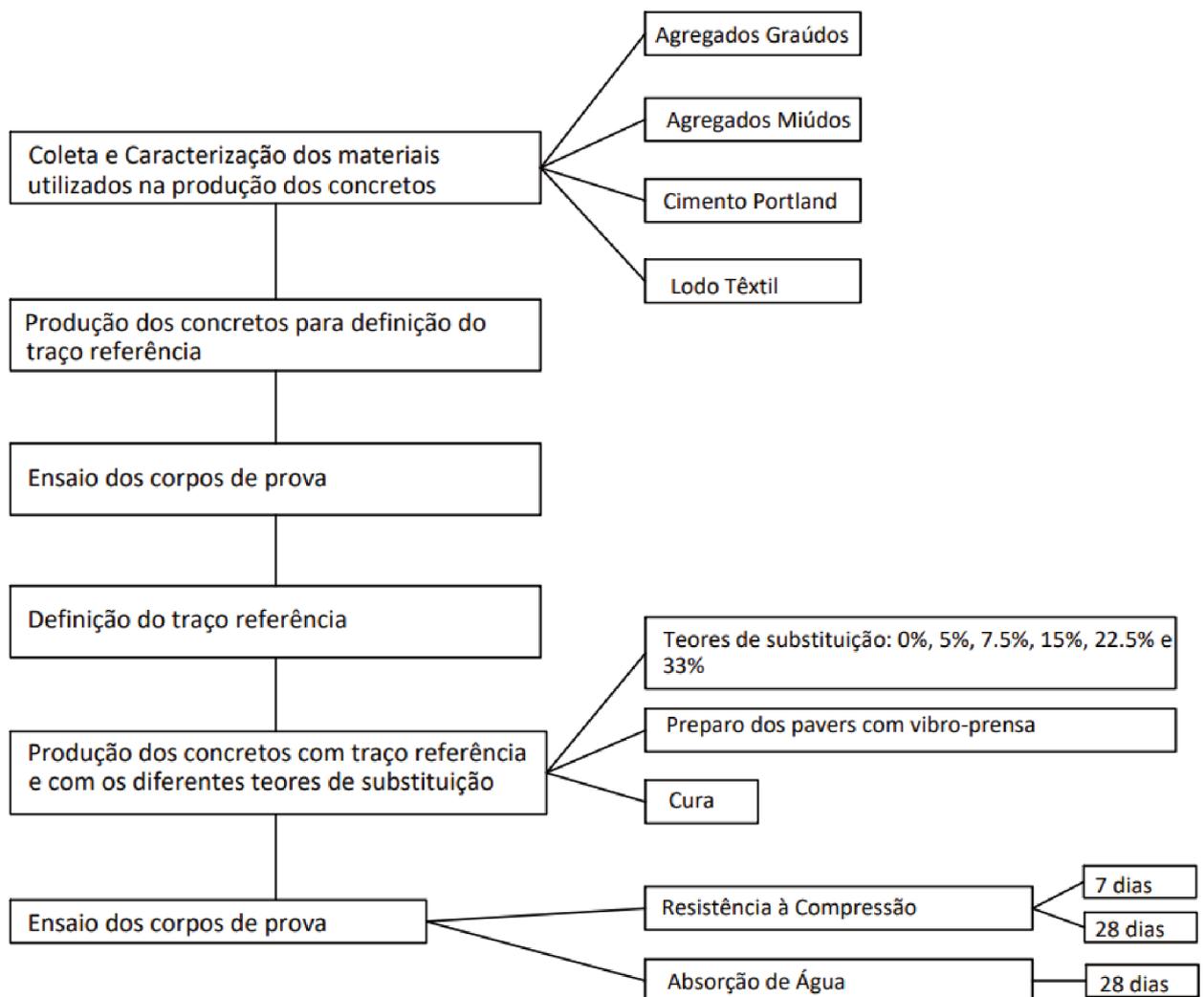
Teor de Lodo incorporado	Relação Água/Cimento	Slump (mm)
0 %	0,67	100
1 %	0,67	105
3 %	0,67	115
5 %	0,67	15

Fonte: Adaptado de Mathye, Ikotun e Fanourakis (2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De modo a atingir os objetivos citados no presente trabalho, foi utilizada a metodologia de pesquisa experimental descrita na Figura 14. Foram avaliadas as propriedades no estado endurecido de concretos desenvolvidos com diferentes teores de substituição de areia fina por lodo têxtil.

Figura 14 – Metodologia da pesquisa experimental desse estudo.



Fonte: Autora (2020).

3.1 Caracterização dos Materiais

3.1.1 Lodo Têxtil

O resíduo têxtil utilizado no presente trabalho foi fornecido por uma lavanderia industrial localizada em Joinville – Santa Catarina. Tal resíduo consiste no lodo residual da estação de tratamento de efluentes. As atividades da empresa envolvem o uso de produtos químicos como: hipoclorito de sódio; metabisulfito sódico; peróxido de hidrogênio; neutralizadores de resíduo alcalino e de cloro; detergentes e amaciantes, sendo a maioria desses corrosivos e perigosos.

O lodo têxtil foi coletado no leito de secagem da estação de tratamento de efluentes da lavanderia em questão e, em seguida, armazenado em um tambor hermético. O material apresenta consistência pastosa, cor azul-acinzentada e odor característico (Figura 15).

Figura 15 – Lodo estudado no presente trabalho.



Fonte: Autora (2020)

Anjos et al. (2017), que estudou o mesmo lodo em diferente aplicação, enviou amostra do resíduo para o ensaio de fluorescência de Raio-X, realizados pelo Departamento de Engenharia Civil do Centro Universitário Católica Santa Catarina – Unidade Joinville e pelo Departamento de Engenharia Mecânica da UDESC – Unidade Joinville. O resultado se encontra na Tabela 4. A partir da análise do ensaio de fluorescência de raio-x, é possível constatar que o lodo analisado apresenta grandes teores de alumínio (Al) e cálcio (Ca). Segundo Anjos et al. (2017), a presença desses elementos pode ser explicado pelo uso de produtos químicos, como sulfato de alumínio como agente e coagulante e a cal hidratada para corrigir o pH, produtos utilizados durante o processo de tratamento de efluentes. Outros elementos que aparecem em proporções consideráveis são Silício (Si), Enxofre (S) e Magnésio (Mg).

Tabela 4 – Resultado do ensaio de Fluorescência de Raio-x.

Metal	% na Amostra	Padrão
Al	17,0	Al_2O_3
Ca	63,1	CaO
K	0,4	K_2O
Cl	0,2	Cl
S	4,1	SO_3
P	2,2	P_2O_5
Si	5,1	SiO_2
Na	1,2	Na_2O
Mg	6,3	MgO
Fe	0,3	Fe_2O_3
Sr	0,1	SrO

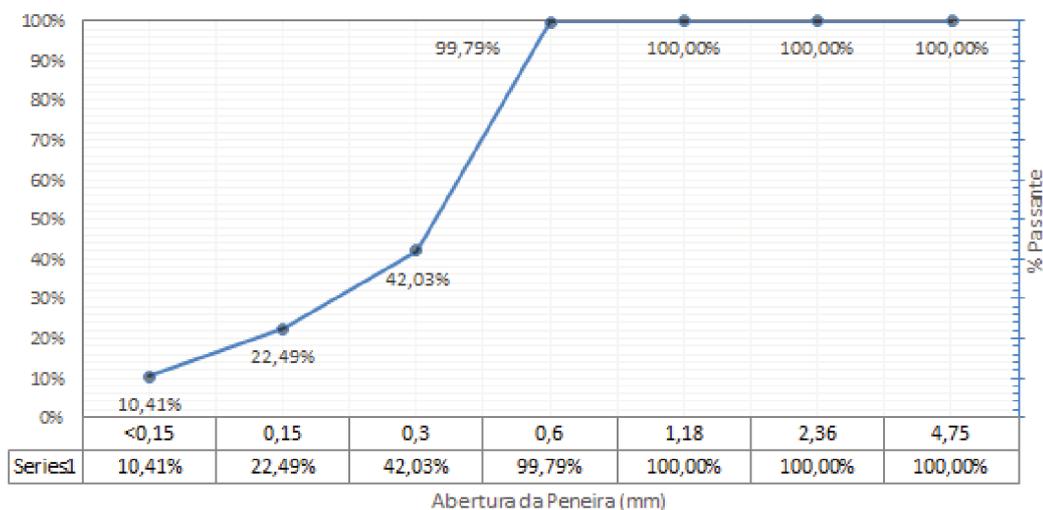
Fonte: Anjos et al. (2017)

3.1.2 Processamento do Lodo Têxtil

O processamento do lodo foi feita através da secagem em estufa a 110°C por aproximadamente 24 horas, sendo misturado três vezes durante esse período para uma secagem mais eficiente, devido à grande quantidade de água presente no lodo. Após a secagem, o resíduo passou pelo processo de moagem e peneiramento para a obtenção da granulometria máxima de 0,60 mm, segundo a norma brasileira NBR NM 248 ABNT (2003a). Em seguida, o lodo foi armazenado em recipiente fechado de modo a evitar contato com a umidade do ar.

A composição granulométrica obtida pelo lodo após os processos de secagem, moagem e peneiramento e está apresentada na figura 16.

Figura 16 – Curva Granulométrica do Lodo Têxtil.



Fonte: Autora (2020).

3.1.3 Cimento

O cimento selecionado para a produção dos concretos é um CP II-F-40, que consiste num cimento Portland composto com fíler calcário. Esse produto é normalizado pela norma brasileira NBR 16697 ABNT (2018), suas especificações estão apresentadas na Tabela 5. A escolha do cimento foi feita devido à sua elevada resistência inicial, importante parâmetro para a produção de pavers, rápida secagem, agilizando e facilitando a desforma, e por apresentar menor teor de adições ao cimento. O fíler calcário é inerte, o que limita as reações químicas com o lodo.

Tabela 5 – Especificações do Cimento CP II-F-40

Exigências Químicas	
Resíduo Insolúvel (RI) (%)	≤ 7,5
Perda ao Fogo (PF) (%)	≤ 12,5
Óxido de magnésio (MgO) (%)	-
Trióxido de Enxofre (SO ₃) (%)	≤ 4,5
Exigências Físicas e Mecânicas	
Finura - Resíduo na peneira 75 μm (%)	≤ 10
Tempo de início de pega	1 hora
Expansibilidade a quente (mm)	≤ 5
Resistência à compressão 1 dia (Mpa)	-
Resistência à compressão 3 dia (Mpa)	≥ 15
Resistência à compressão 7 dia (Mpa)	≥ 25
Resistência à compressão 28 dia (Mpa)	≥ 40

Fonte: ABNT (2018)

3.1.4 Agregados

A escolha dos agregados a serem utilizados no concreto influenciam diretamente nos diversos parâmetros de qualidade dos pavers. Agregados com propriedades adequadas garantem melhor compactação e, conseqüentemente, produzem pavers mais resistentes (SHACKEL, 1991).

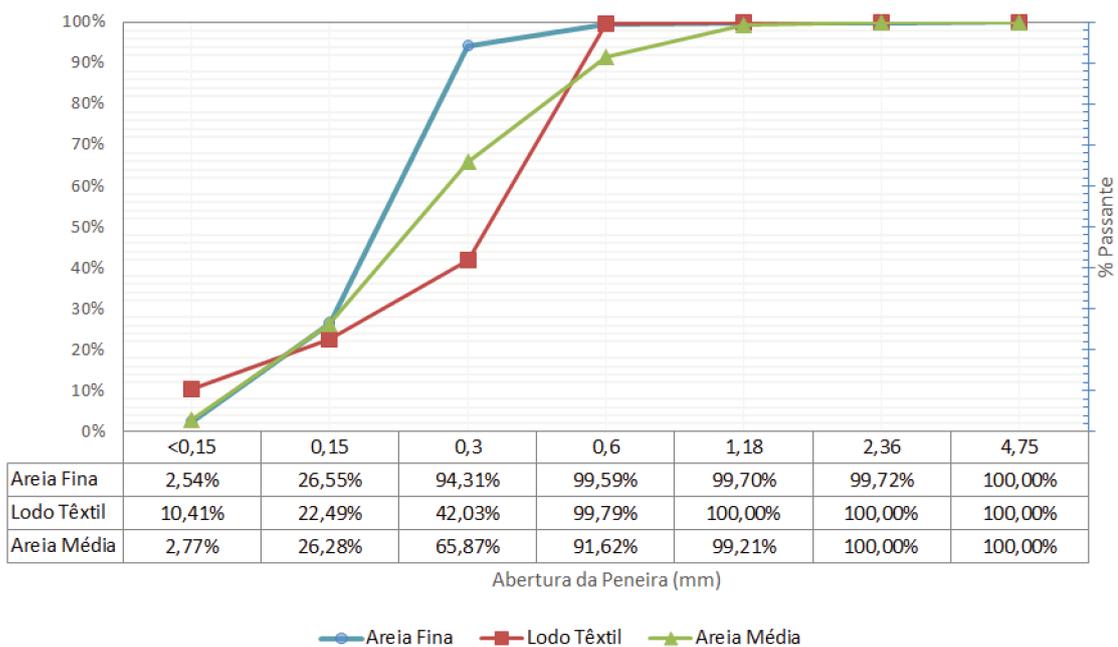
Sendo assim, no presente trabalho optou-se por utilizar três diferentes tipos de agregados de forma a favorecer melhor empacotamento dos grãos e visando melhores resistências. Foram utilizados areia fina, areia média e pedrisco, todos esses de origem da região de Joinville-SC, fornecidos pelo Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC - CTJ. O lodo têxtil foi utilizado no presente trabalho como substituição da areia fina na mistura dos concretos.

3.1.4.1 Caracterização dos Agregados

Para a caracterização dos agregados foram estudadas suas propriedades de composição granulométrica e massa específica. O estudo da composição granulométrica dos agregados foi realizado seguindo especificações da norma brasileira NBR NM 248 ABNT (2003a). A massa específica foi determinada utilizando as especificações das normas NM 52 ABNT (2003b) para os agregados miúdos e lodo, e a norma NM 53 ABNT (2009) para o pedrisco.

A curva granulométrica dos agregados miúdos e lodo estão apresentados na Figura 6, enquanto a relativa ao pedrisco está apresentada na Figura 7. A partir dos resultados encontrados na comparação das curvas granulométricas dos agregados miúdos e do lodo, é possível perceber certa semelhança na composição de tamanho de grãos entre os três materiais, possibilitando a conceitualização da substituição da areia fina pelo lodo.

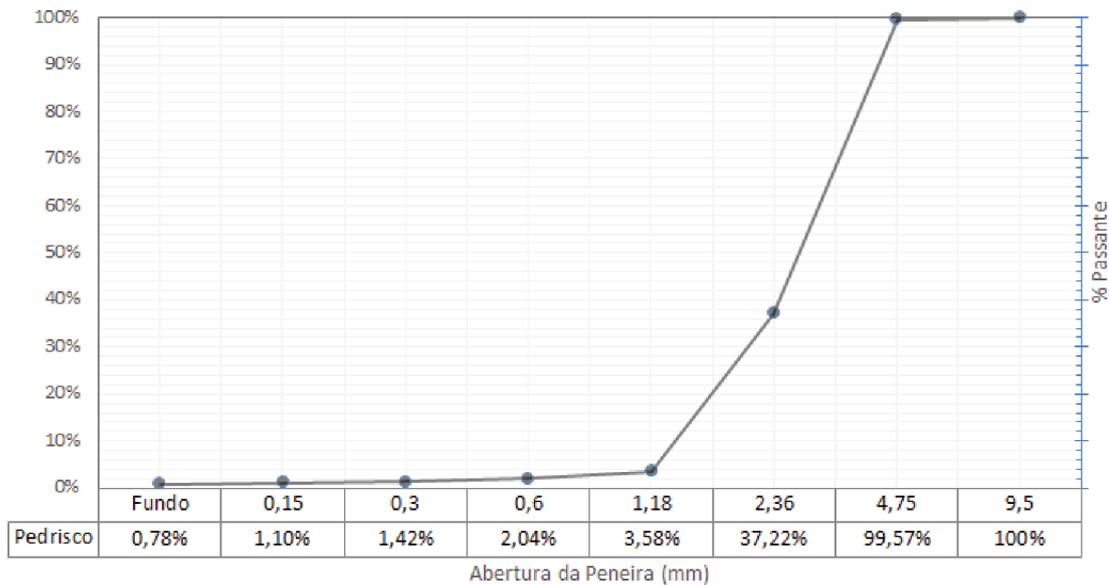
Tabela 6 – Curva Granulométrica dos agregados miúdos.



Fonte: Autora (2020).

Os valores de massa específica encontrados estão apresentadas na Tabela 8. Ao analisar esses resultados, pode-se constatar que o lodo têxtil é um material muito mais leve em massa específica que os demais agregados, sendo necessário compensar o aumento de volume causado pelo mesmo na substituição da areia fina.

Tabela 7 – Curva Granulométrica do Pedrisco.



Fonte: Autora (2020).

Tabela 8 – Massas Específicas dos Materiais Ensaados.

Material	Massa Específica (g/cm³)
Areia Fina	2,58
Areia Média	2,55
Pedrisco	2,58
Lodo Têxtil	1,22

Fonte: Autora (2020).

3.1.4.2 Moldagem dos corpos de prova e escolha do traço piloto

Para a definição das resistências à compressão desses traços, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm, utilizando compactação com soquete, de modo a reproduzir a compactação feita pela vibro-prensa em pavers. A compactação utilizando vibro-prensas não é padronizada ou normatizada, sendo assim, foi definida uma energia de compactação de forma empírica.

Os corpos de prova foram compactados em moldes cilíndricos com volume de 1570,8 cm³ utilizando o Soquete Grande do Ensaio de Compactação Proctor – massa de 4,536 kg e altura de queda de 47,5 cm –, compactando três camadas com 25 golpes cada.

Para o cálculo da energia de compactação, utiliza-se a Equação 3.1 a seguir:

$$E = \frac{n \cdot N \cdot P \cdot H}{V} \quad (3.1)$$

Sendo:

- E : Energia de Compactação;
 n : Número de camadas;
 N : Número de golpes aplicados por camada;
 P : Peso do soquete;
 H : Altura de queda do soquete;
 V : Volume do molde;

A partir da Equação 3.1, têm-se que a energia utilizada para a compactação dos corpos de prova foi de 6,86 kg.cm/cm².

3.2 Definição do Traço Piloto

A partir de traços obtidos na bibliografia de Fioriti (2007), desenvolveu-se uma dosagem empírica empregando os parâmetros de aceitação para pavers indicados pela norma brasileira NBR 9781 (ABNT, 2013), juntamente com uma esperada queda de resistência ocasionada pela substituição de parte do agregado por lodo têxtil. Foram executadas três diferentes dosagens utilizando o método empírico para definir os traços da Tabela 9.

Tabela 9 – Dosagens para definição do traço piloto

Traço	Cimento (kg)	Areia Fina (kg)	Areia Média (kg)	Pedrisco (kg)
1:6	1,00	1,95	1,95	2,10
1:4	1,00	1,30	1,30	1,40
1:2	1,00	0,65	0,65	0,70

A/C | 0,46

Fonte: Autora (2020).

Empregando este procedimentos, foram moldados quatro corpos de prova por dosagem, os quais foram submetidos à ruptura por compressão axial aos 7 dias. Os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de resistência à compressão para definição do traço piloto.

Dosagem	1:2	1:4	1:6
Resistência à compressão (MPa)	43,91	14,50	3,75
	45,76	12,01	4,92
	47,17	11,19	3,29
	47,33	14,15	2,96
Média	46,04	12,96	3,93

Fonte: Autora (2020).

Após a análise dos resultados de resistência à compressão dos três traços, definiu-se o traço 1:2 como traço piloto, visto que é o único a alcançar resistência maior que 35 MPa, exigido pela norma NBR 9781 ABNT (2013).

3.3 Dosagem experimental dos corpos de prova

A partir da escolha do traço referência, tornou-se possível a definição dos traços para a produção de concreto com lodo têxtil. As dosagens foram calculadas considerando os teores de substituição da areia fina do traço piloto, sendo este o único parâmetro alterado. Os teores de areia fina substituídos por lodo foram de 5%, 7,5%, 15%, 22,5% e 30%, em massa. Entretanto, a massa específica do lodo é menor que a da areia fina, desta forma, resultando em um aumento de volume da mistura. Para a compensação desse aumento, foi determinada a quantidade de lodo a ser utilizada fazendo emprego da metodologia descrita na sequência.

Inicialmente, calculou-se a massa de areia fina referente ao teor de substituição da dosagem. Então, aplicou-se a Equação 3.2 para determinar a massa de lodo têxtil a ser incorporado, considerando a diferença de volume dos dois materiais.

$$M_{amr} = \frac{M_{amn} \cdot \delta_{amr}}{\delta_{amn}} \quad (3.2)$$

Onde:

M_{amr} = Massa do agregado leve, em kg;

M_{amn} = Massa do agregado miúdo natural, em kg;

δ_{amr} = Massa específica do agregado miúdo leve, em kg/dm³;

δ_{amn} = Massa específica do agregado miúdo natural, em kg/dm³.

A partir dessa metodologia, foram definidas as dosagens executadas neste trabalho, que estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Dosagens para produção de pavers

Dosagem	Cimento (kg)	Areia Fina (kg)	Areia Média (kg)	Pedrisco (kg)	Lodo (kg)
00%	1,00	0,65	0,65	0,70	-
05%	1,00	0,62	0,65	0,70	0,015
7,5%	1,00	0,60	0,65	0,70	0,023
15%	1,00	0,56	0,65	0,70	0,046
22,5%	1,00	0,52	0,65	0,70	0,059
30%	1,00	0,49	0,65	0,70	0,092

A/C | 0,46

Fonte: Autora (2020).

3.4 Produção dos Pavers

Os pavers foram produzidos utilizando uma vibro-prensa pneumática (Figura 17). Esse equipamento possui molde único para fabricação de blocos de concreto de dimensões 40cm x 40cm x 6cm, como apresentado na Figura 18. Sendo assim, foi realizada a mistura do concreto em uma betoneira e, após concluída a mistura, o concreto fresco foi transferido para a vibro-prensa para produção de duas placas de concreto por dosagem.

Figura 17 – Vibro-prensa utilizada para produção das placas de concreto.



Fonte: Autora (2020).

Figura 18 – Molde para placa de concreto.



Autora (2020).

Após cerca de 5 dias de cura do concreto, cada placa foi devidamente medida e cortada utilizando uma serra circular equipada com disco diamantado específico para concreto. Foram produzidos oito pavers retangulares por placa, com dimensões 10cm x 20cm x 6cm (Figura 19). Os pavers passaram pelo ciclo de cura natural, ou seja, em condições ambientes.

Figura 19 – Processo de corte das placas de concreto para produção de pavers.



Fonte: Autora (2020).

Foram produzidas duas placas de concreto por traço, resultando em 16 pavers por traço. Desses, 10 pavers foram utilizados em ensaios de resistência à compressão, sendo rompidos 4 aos 7 dias e 5 aos 28 dias de idade. Para o ensaio de absorção de água foram utilizados 3 pavers por traço, executado aos 28 dias.

3.5 Ensaios Executados

3.5.1 Resistência à Compressão

A resistência a compressão é um dos parâmetros mais importantes na avaliação da qualidade de pavers. O ensaio foi executado seguindo as determinações da norma brasileira NBR 9780 ABNT (2013) no Laboratório para Ensaios de Solo, Asfalto e Concreto de uma empresa localizada em Joinville – SC.

Os pavers foram dispostos sobre as placas auxiliares de ensaio de modo que o eixo das placas auxiliares da prensa coincidisse com o centro do paver. Após a centralização, o carregamento foi aplicado pela prensa perpendicularmente à superfície do paver, com aumento da carga de aproximadamente 500 kPa/s.

Para a preparação dos corpos de prova foi realizado o capeamento utilizando pasta de cimento segundo as especificações da norma Mercosul NM 77 CNM (1996): Concreto - Preparação das bases dos corpos-de-prova e testemunhos cilíndricos para ensaio de compressão (Figura 20). Assim, foram preparados nove pavers por dosagem de concreto, sendo ensaiados quatro aos 7 dias e cinco aos 28 dias.

Figura 20 – Paver após capeamento.



Fonte: Autora (2020).

A resistência à compressão de cada peça (f_{pi}), em megapascals, é obtida através da divisão do valor da carga de ruptura da amostra (F), em Newtons, pela área de carregamento (A), em milímetros quadrados. Por fim, multiplica-se o valor encontrado pelo fator "p" que, segundo a NBR 9781 ABNT (2013), ajusta o valor da resistência à compressão em função da altura do corpo de prova. (Equação 3.3).

$$F_{pi} = \frac{F}{A} \cdot p \quad (3.3)$$

A Tabela 12 apresenta o fator p a ser utilizado de acordo com a dimensão da peça. Nesse trabalho foram produzidos pavers com espessura de 60mm, logo, adotou-se o fator p de 0,95. A resistência característica à compressão (f_{pk}) de cada traço foi definida a partir da média aritmética das resistências individuais dos corpos de prova.

Tabela 12 – Fator multiplicativo "p" em função da espessura da peça.

Espessura nominal da peça (mm)	Fator p
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Fonte: (ABNT, 2013)

3.5.2 Absorção de água

O ensaio de absorção de água avalia o aumento na massa do paver devido a penetração de água em seus poros, em relação à sua massa em estado seco. Uma maior absorção representa maior porosidade do corpo de prova (ABNT, 2013).

O ensaio foi realizado no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC - CTJ, seguindo os procedimentos especificados pela norma NBR 9780 (2013). Foram ensaiados 3 pavers por traço de concreto com idades superiores a 28 dias.

A preparação das amostras foi feita retirando as partículas soltas dos corpos de prova utilizando uma escova. Em seguida, o procedimento especificado por norma foi realizado:

- Saturação: imersão dos corpos de prova em água, por 24 horas, à temperatura de aproximadamente 23°C. Após esse período, removeu-se a água superficial e pesou-se os corpos de prova em balança digital, anotando o valor encontrado (m_2).
- Secagem: secar os corpos de prova em estufa, por 24 horas, à temperatura de aproximadamente 110°C. Após esse período, pesar os corpos de prova em balança digital e anotar o valor encontrado (m_1).

A absorção de água foi calculada utilizando a Equação 3.4:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Onde:

A : Absorção do corpo de prova, em porcentagem (%);

m_1 : Massa do corpo de prova seco, em gramas (g);

m_2 : Massa do corpo de prova saturado, em gramas (g).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Resistência à compressão

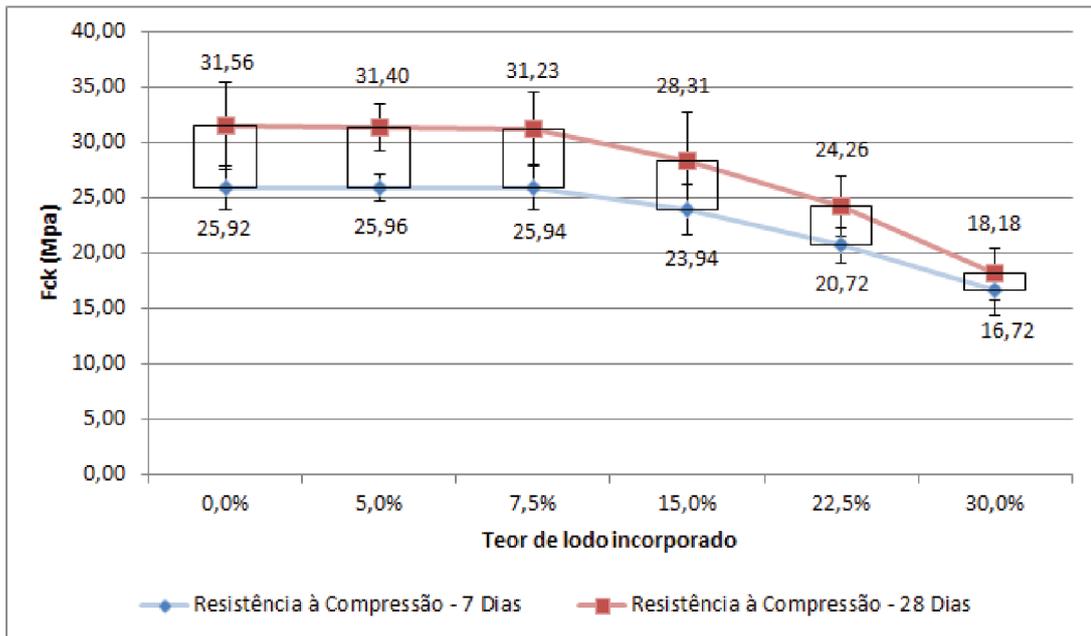
Conforme a norma NBR 9781 ABNT (2013) a resistência característica à compressão (f_{pk}) aos 28 dias para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha deve atingir valores iguais ou superiores a 35 MPa, sendo que as peças de concreto com idade inferior a 28 dias devem apresentar no mínimo 80% dessa f_{pk} , ou seja, 28 MPa. Conforme demonstrado na Figura 21, a resistência característica à compressão aos 28 dias no traço piloto atingiu 31,36 MPa, com valores progressivamente menores conforme o aumento percentual de lodo incorporado à mistura. O valor mínimo de 28 MPa de f_{pk} também não foi atingido nas peças de concreto com idades inferiores à 28 dias com valores significativamente menores de f_{pk} a partir de 15% de lodo incorporado à mistura.

A produção dos pavers foi executada utilizando metodologia diferente da utilizada nos corpos de prova para definição do traço piloto. Para os pavers, utilizou-se uma vibro-prensa que, ao moldar as placas com menores teores de lodo (0% e 5%) gerou segregação das fases do concreto, o que pode ter contribuído para uma redução na resistência. Isso ocorreu devido à grande quantidade de água adicionada na mistura, juntamente com o aumento de trabalhabilidade atrelado a pequenas quantidades de substituição por lodo (MATHYE; IKOTUN; FANOURAKIS, 2020). A partir de 7.5% de lodo substituído, percebeu-se, visualmente, uma queda na trabalhabilidade, permitindo uma melhor moldagem dos pavers. Segundo Mathye, Ikotun e Fanourakis (2020), essa queda é consequência da alta absorção de água pelo lodo devido à grande área superficial.

Nota-se nos traços de 5% e 7,5% um pequeno, embora não significativo, acréscimo na resistência à compressão aos 7 dias em relação ao traço piloto, o que não se estende aos demais traços analisados. Há, na sequência, uma tendência de queda dessa resistência, que se torna progressivamente menor conforme se aumenta o percentual de lodo agregado à mistura. Essa queda representa 7.62% e 20.05% para os traços 15 e 22.5% de lodo incorporado, chegando até 16,72 MPa no traço de 30%, caracterizando uma queda de 35,48% na resistência em relação ao traço piloto.

A queda se torna ainda maior aos 28 dias, quando a diferença na resistência característica à compressão entre o traço piloto e o traço com 30% de lodo incorporado atinge 42,38%. Ademais, ao contrário do que é verificado aos 7 dias, não se observa f_{pk}

Figura 21 – Resultados de Resistências médias à compressão - 7 e 28 dias.



Fonte: Autora (2020).

superior ao traço piloto em nenhum percentual de substituição aos 28 dias, e há queda percentual da resistência conforme aumenta a incorporação de lodo, com valores de 0.51%, 1.05%, 18,3% e 23.12% para os traços de 5, 7.5, 15 e 22.5%, respectivamente, em relação ao traço piloto.

Isso pode ser constatado na Figura 16 cujo gráfico compara o resistência à compressão atingida pelos corpos de prova em 7 e 28 dias e demonstra o ganho de resistência entre idades. Observa-se um ganho de fpk entre idades gradativamente menor conforme se eleva a porcentagem de substituição por lodo na mistura, com um ganho entre idades de apenas 8,05% no traço com 30% de substituição em comparação com 17,88% apresentados no traço piloto.

Portanto, apesar do maior ganho de fpk aos 7 dias nos traços com 5% e 7,5% de substituição, a influência negativa exercida pelo lodo no ganho de resistência entre idades faz com que esses traços apresentem menor resistência na idade final (28 dias) em relação ao traço piloto.

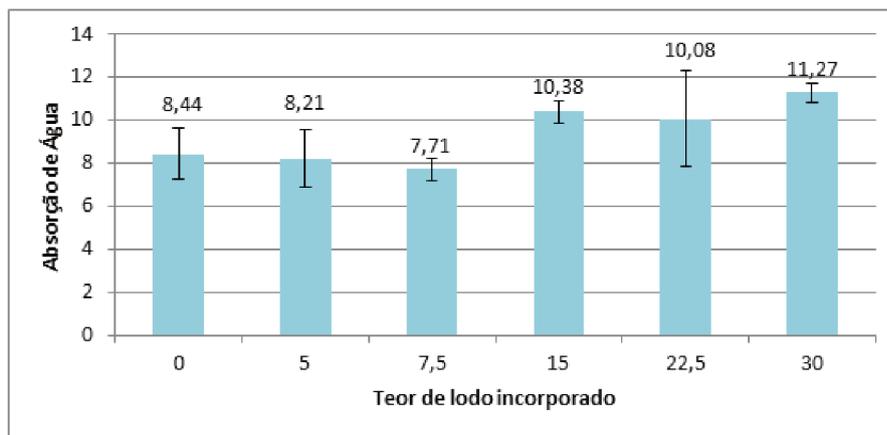
O efeito deletério da incorporação do lodo na resistência final dos pavers pode ser explicada por diversos fatores. Conforme observado por Wang et al. (2018) em seu estudo, a presença de matéria orgânica no lodo impede a formação de portlandita e $C - S - H$, o que culmina na redução de resistência à compressão. Além disso, conforme Liu et al. (2020) pontuou, a perda de coesão entre lodo e matriz da pasta de cimento influencia negativamente na resistência do produto final. Ademais, a alta capacidade de absorção de água do lodo seco impede a correta hidratação do cimento, diminuindo sua resistência final.

4.2 Absorção de água

A NBR 9781 da ABNT define absorção de água como o incremento de massa de um corpo sólido poroso em relação a sua massa em estado seco devido penetração de água em seus poros. Essa absorção é expressa em porcentagem, e o valor médio deve ser menor ou igual a 6%, não admitindo valores individuais maiores que 7%.

É possível observar na Figura 22 que existe uma tendência inicial de diminuição na absorção de água do traço piloto (absorção média de 8,44%) em relação ao traço com 5% de lodo incorporado (absorção média de 8,21%), e deste quando comparado ao traço 7,5% (absorção média de 7,71%). Valores maiores de absorção nos traços piloto e de 5% podem ser explicados pela maior fluidez apresentada, o que culminou numa moldagem prejudicada, possivelmente resultando em maiores quantidade de poros. A queda na absorção de água conforme o aumento de lodo incorporado até 7,5%, por sua vez, pode ser justificada pela melhor trabalhabilidade adquirida pelo concreto ao adicionar o lodo, o que permite moldagem mais efetiva com menos espaços vazios.

Figura 22 – Resultado do ensaio de absorção de água.



Fonte: Autora (2020).

Houve aumento expressivo de 34,71% na absorção de água entre 7,5% e 15% de lodo incorporado. Quando se comparam os valores obtidos nos traços de 15 e 30%, verifica-se aumento percentual de 8,54%. O traço com 22,5% de lodo incorporado, apesar de representar aumento em porcentagem de 30,83 em relação ao traço 7,5%, exprime um padrão atípico quando comparado ao seu traço antecessor (15%), com redução de 2,88% na absorção de água. É importante salientar, no entanto, que a absorção média de 10,08% encontrada para o traço de 22,5% apresenta desvio padrão de 2,2 – o maior encontrado dentre as amostras analisadas, como pode ser observado na Tabela 13. Ao comparar os resultados obtidos no traço piloto com os demais, pode-se analisar com maior clareza as curvas de queda e posterior ganho supracitados. Os traços de 5 e 7,5% apresentaram, em relação ao traço piloto, queda de 2,76% e 8,66%

na absorção de água. Por sua vez, os traços de 15, 22,5 e 30% apresentaram grande aumento percentual de 23,04, 19,5 e 33,56% respectivamente.

Tabela 13 – Resultados do ensaio de absorção de água

Traço	0%	5%	7,5%	15%	22,5%	30%
Absorção da Amostra 1 (%)	7,46	9,42	7,89	10,11	11,44	10,79
Absorção da Amostra 2 (%)	9,76	8,44	8,10	10,05	11,28	11,54
Absorção da Amostra 3 (%)	8,10	6,76	7,13	10,99	7,54	11,48
Absorção de água média (%)	8,44	8,21	7,71	10,38	10,08	11,27
Desvio Padrão	1,19	1,34	0,51	0,53	2,21	0,42

Fonte: Autora (2020).

Segundo Neville (2015), concretos de boa qualidade apresentam absorção de água menores que 10%. Logo, apesar de os valores médios de absorção de água obtidos para os traços analisados não corresponderem aos 6% requeridos pela NBR ABNT (2013), pode-se dizer que os traços com teores até 7,5% de lodo produzem concretos de qualidade, quanto à essa propriedade.

Os resultados obtidos validam as informações trazidas no referencial teórico, evidenciando que os pavers com incorporação de lodo apresentam uma estrutura mais porosa em altos teores de substituição, porém mais densa em baixos teores próximos a 5% (LIU et al., 2020). Decorrente da inter-relação das propriedades de índice de vazios e absorção de água, pode-se citar um provável aumento nos índices de vazios com o aumento da quantidade de lodo incorporada ao concreto, como pontuou ALTIDIS et al. (2014), encontrando um aumento de 39,29% nos índice de vazios e 11,37% na absorção de água para os traços com 7% de substituição por lodo têxtil. Esses efeitos podem ser justificado pelo que concluiu Liu et al. (2020), de que o lodo age de forma a absorver grandes quantidades de água e facilita a penetração da mesma no concreto.

5 CONCLUSÕES

Esse trabalho avaliou a influência do lodo no comportamento de pavers de concreto, ao serem utilizados como substituição da areia fina em teores de 0%, 5%, 7.5%, 15%, 22.5% e 30%.

O lodo de ETE de lavanderia industrial se trata de um resíduo muito leve em massa específica ($1,22 \text{ g/cm}^3$) quando comparado aos materiais utilizados como agregado miúdo, sendo necessário a compensação do volume do mesmo na substituição. Com relação à composição granulométrica, constatou-se a semelhança entre os materiais lodo e agregados miúdos.

Os ensaios de resistência à compressão demonstraram que, nesse estudo os traços não atingiram o valor mínimo de 35 MPa exigido pela norma NBR 9781 ABNT (2013) para tráfego leve. Apesar de os pavers com substituição de lodo apresentarem resistências mais baixas em relação àqueles que utilizaram o traço piloto, essa queda de resistência foi menor que naqueles com menores taxas de lodo, representando redução de apenas 1,05% para o traço com 7,5% de substituição em relação ao traço piloto. A queda de resistência foi mais expressiva a partir de 15% de substituição por lodo, com quedas maiores que 18%.

Assim como para a resistência à compressão, nenhum traço ensaiado atendeu aos valores mínimos exigidos pela NBR 9781 da ABNT para absorção de água. Apesar da melhora inicial na absorção do traço de 5% em relação ao piloto e do traço 7,5% em relação a este, *houve piora bastante significativa a partir de 15% de lodo incorporado à mistura. O valores encontrados no presente estudo demonstraram melhor desempenho para absorção no traço de 7,5% de lodo incorporado, com 7,71% como valor médio de absorção e queda de 8,66% em relação ao piloto.*

Os resultados encontrados nesse trabalho referentes ao comportamento mecânico dos pavers podem ser explicados pelos seguintes fatores: relevante presença de matéria orgânica presente no lodo (WANG et al., 2018); grande potencial de absorção de água do lodo, reduzindo a disponibilidade de água para a hidratação do cimento (LIU et al., 2020); e baixa coesão entre o lodo e a matriz da pasta de cimento, a nível microscópico (LIU et al., 2020).

A partir do exposto, constata-se que o melhor traço com substituição por lodo, entre os analisados no presente trabalho, foi de teor de 7,5%. Os pavers produzidos empregando lodo de ETE de lavanderias industriais como substituição da areia fina podem ser utilizados em locais com solicitações mais leves que as indicadas na norma

NBR 9781, como em calçadas, ciclovias, condomínios e praças. Sua utilização como pavimento intertravado requer mais pesquisas para enriquecer os conhecimentos acerca da incorporação desse resíduo e definição de uma produção padronizada, com ajuste de traço que possibilite alcançar os parâmetros exigidos pela norma.

5.1 Sugestão de trabalhos futuros

- Analisar as propriedades da microestrutura do concreto com lodo;
- Analisar a substituição do lodo in natura;
- Analisar a substituição do lodo calcinado;
- Analisar o efeito de diferentes tipos de cura no concreto com lodo;
- Estudar diferentes métodos de dosagem para pavers que possam ser aplicados nos concretos com lodo de lavadeira industrial.

REFERÊNCIAS

ALTIDIS, M. E. D. et al. Desenvolvimento de compósitos utilizando lodo da indústria têxtil na produção de concreto não estrutural. Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. **São Paulo: SP**, 2001.

ANJOS, D. C. d. et al. Estudo sobre a influência do lodo têxtil gerado por uma lavanderia industrial, aplicado em argamassa de cimento portland composto de fíler. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Pavimento Intertravado**: Passeio público. 2010. 36 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados: determinação da composição granulométrica. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos-classificação. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15953**: Pavimento intertravado com peças de concreto — execução. 2011. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. 2013. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento portland: Requisitos. 2018.

BARBOSA, G. S. O desafio do desenvolvimento sustentável. **Revista Visões**, v. 4, n. 1, p. 1–11, 2008.

BEATY, A. N. Laying course materials: Specification and performance. In: **Fifth International Concrete Block Paving Conference**. [S.l.: s.n.], 1996. p. 129–139.

BERLIM, L. Moda e sustentabilidade: uma reflexão necessária. **São Paulo: Estação das letras e cores**, 2012.

BLUMENSCHNEIN, R. N. A sustentabilidade na cadeia produtiva da indústria da construção. **Brasília: Tese de Doutorado**, 2004.

BUSS, M. V. et al. Tratamento dos efluentes de uma lavanderia industrial: Avaliação da capacidade de diferentes processos de tratamento. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 2, n. 1, p. 2–10, 2015.

CARVALHO, M. Et-27 pavimentação com peças pré-moldadas de concreto. **4º Edição. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland–ABCP**, 1998.

CATARINA, S. Diagnóstico dos recursos hídricos e organização dos agentes da bacia hidrográfica do rio tubarão e complexo lagunar. **Florianópolis: Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente**, 1998.

COMITÊ MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 77: Concreto - preparação das bases dos corpos-de-prova e testemunhos cilíndricos para ensaio de compressão**. 1996.

CRUZ, L. O. **Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. [S.l.]: Jun, 2003.

DNIT, M. d. P. Departamento nacional de infraestrutura de transportes. 2ª edição. **Editado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Ministério dos Transportes, Brasil**, 2006.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.

HEREK, L. C. S. Incorporação de lodo proveniente de lavanderia industrial em argila para a fabricação de tijolos. Universidade Estadual de Maringá, 2009.

KAMINATA, O. T. **Aproveitamento do lodo gerado no tratamento de efluente da indústria de lavanderia têxtil na produção de bloco de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Maringá, 2008.

KNAPTON, J. The romans and their roads-the original small element pavement technologists. In: **5th International Concrete Block Paving Conference, Tel-Aviv, Israel**. [S.l.: s.n.], 1996.

KUNZ, A. et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química nova, SciELO Brasil**, v. 25, n. 1, p. 78–82, 2002.

LAPOLLI, F. R. et al. Desinfecção de efluentes sanitários através de dióxido de cloro. **Engenharia Sanitária e Ambiental, SciELO Brasil**, v. 10, n. 3, p. 200–208, 2005.

LEKSHMI, S.; SASIDHARAN, S. Experimental investigation on the use of textile sludge in concrete. **International Journal of Advances in Engineering & Technology, IAET Publishing Company**, v. 8, n. 4, p. 559, 2015.

LIU, Y. et al. Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: Microstructural analysis, durability and leaching properties. **Journal of Environmental Management, Elsevier**, v. 262, p. 110352, 2020.

- MANZINI, E.; VEZZOLI, C. A. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis. Os requisitos ambientais dos produtos industriais.** [S.l.]: Edusp, 2002.
- MATHYE, R.; IKOTUN, B.; FANOURAKIS, G. The effect of dry wastewater sludge as sand replacement on concrete strengths. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, 2020.
- MENEGUCCI, F. et al. Resíduos têxteis: Análise sobre descarte e reaproveitamento nas indústrias de confecção. **REIS**, p. 4, 2015.
- MENEZES, J. C. S. d. S. Tratamento e reciclagem do efluente de uma lavanderia industrial. 2005.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição.** [S.l.]: Bookman Editora, 2015.
- SAKTHIVEL SARATHI, S. S. Experimental investigation on textile mill sludge with partial replacement of fine aggregate in concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology**, IRJET, v. 6, n. 3, 2019.
- SANDESH, N.; VARUN, K.; PRASHANTH, V. A study on engineering properties of textile etp sludge based cement concrete. **International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET) Volume**, v. 4, p. 2319–1058, 2014.
- SHACKEL, B. **Design and construction of interlocking concrete block pavements.** [S.l.]: Elsevier Applied Science, 1991.
- SINDILAV. **PANORAMA DO MERCADO DE LAVANDERIAS.** 2020. Disponível em: <<http://www.sindilav.com.br/mercado-panorama.php>>. Acesso em: 2010-09-30.
- VELUMANI, P.; SENTHILKUMAR, S. Production of sludge-incorporated paver blocks for efficient waste management. **Journal of the Air & Waste Management Association**, Taylor & Francis, v. 68, n. 6, p. 626–636, 2018.
- WANG, L. et al. Recycling dredged sediment into fill materials, partition blocks, and paving blocks: Technical and economic assessment. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 199, p. 69–76, 2018.